

8장

과학의 연구 방법

자연과학과 사회과학의 많은 연구들은 현상을 설명하는 가설을 세운 후, 그것을 관찰이나 실험, 혹은 통계 조사를 통해 평가하는 작업으로 이루어진다. 최근 많은 학자들은 유난히 따뜻해진 날씨에 대해 그것이 온실 효과에 의한 지구 온난화의 결과라는 주장을 하고 있다. 그러나 어떤 학자들은 그러한 지구 온난화의 경향이 있다는 것을 믿지 않으며, 때로는 지구 온난화의 경향이 있다 하더라도 그것이 온실 효과 때문은 아니라고 주장하기도 한다. 그들 각각은 어떻게 가설을 세우고 어떤 증거로 그것을 뒷받침했을까? 또는 경쟁 가설이 틀리거나 적어도 틀릴 수 있다는 것을 어떻게 보였을까? 만약 여러분이 이를 연구한다면, 남의 가설을 비판하거나 자신의 가설을 정당화하기 위해 어떤 자료를 얻어야 할까? 어떤 경우에 내가 얻은 자료를 가지고 나의 가설이 맞다고 주장할 수 있을까? 또한 이러한 자료들에 의해 뒷받침될 가설은 대체 어떻게 만들어낼 수 있을까?

이 장에서는 바로 과학의 기본적인 연구 방법을 설명하고자 한다. 여기서 소개하는 방법은 실제 연구에 바로 적용할 수 있을 정도로 구체적이지 않다. 실제 구체적인 연구 방법은 각 연구 분야마다의 훈련을 필요로 한다. 그럼에도 여기서 소개된 방법은 가장 기본적인 지침으로서, 연구를 처음 시작할 때, 연구를 해나가는 과정에서 자신의 연구를 점검할 때, 그리고 연구를 논문으로 작성할 때에는 어느 정도 쓸모가 있을 것이다.

이 작업을 하기 전에 우선 기본적인 개념부터 정리해보자.

1. 이론, 모형, 가설

자연과학과 사회과학 연구에서는 다양한 이론이 언급된다. 원자 이론, 우주대폭발 이론, 상대성 이론, 양자 역학 이론, 진화 이론, 초끈 이론, 초전도체 이론, 지구 온난화 이론, 경제학의 합리적 선택 이론, 유효수요 이론 등이 그것이다. 흔히 이러한 이론들은 참된 법칙이나 수학적인 방정식들에 의해 정돈된 지식 체계로 간주되곤 한다. 그러나 법칙이나 수학적인 방정식이 등장하지 않는 지식 체계도 이론으로 불리기도 하고, 반대로 수학적인 방정식으로 가득 차 있으나 실제 세계에는 그대로 적용할 수 없는 상상의 체계도 이론이라 불리기도 한다. 또한 ‘이론’이라는 말은 ‘모형’이나 ‘가설’보다는 잘 입증되었거나 확립된 지식을 가리키는 데 쓰이는 듯도 하지만, “그건 단지 이론일 뿐이야”와 같은 얘기에서 ‘이론’이란 말은 거의 ‘가설’과 같은 의미로 사용되고 있다. 이렇듯, ‘이론’이란 과학 연구를 언급할 때 빼놓을 수 없는 것이긴 하지만 매우 다양한 의미로 사용되고 있다. 이러한 의미의 혼란을 방지하기 위해 앞으로의 내용은 과학철학자 로널드 기어리(Ronald N. Giere)가 『과학적 추론의 이해』에서 정의한 방식에 기초하여 전개하고자 한다. 그의 논의는 ‘모형’에서 시작한다(Giere, Bickle, and Mauldin 2008).

실제로 많은 과학자들은 자신들이 모형을 만드는 일을 하고 있다고 말한다. 원래 모형은 실제 대

상을 닮은 대리물을 뜻한다. 예를 들어 자동차 모형, 비행기 모형 등은 실제 자동차나 비행기를 본떠 만든 것들이다. 공학에서는 그런 모형들을 이용해 실제로 여러 실험을 하며 필요한 정보를 얻기도 한다. 그러나 자연과학 연구에서 중요한 것은 그와는 조금 다른 모형들이다. 원자에 대한 태양계 모형이나 DNA 모형 등은 과학적인 맥락에서 자주 언급되는 모형들이다. 이 모형들은 실제로는 눈으로 볼 수 없거나 접근하기 힘든 실제 대상을 일종의 ‘상상’으로 만들어낸 것이다. 이러한 모형들은 실제 철사나 구슬 같은 것들로 물질적으로 만들 수도 있지만, 연구 논문 속에 글로만 서술되어 있을 수도 있다. 이러한 모형을 다른 말로 ‘이론적 모형’이라고도 한다.

이론적 모형은 상상의 고안물이다. 그 모형은 실세계의 특정한 대상이나 현상을 표상하기 위해 만든 것으로, 여러분은 현상을 일으키는 메커니즘을 추정하여 그 현상에 대한 이론적 모형을 만들 수 있을 것이다. 예를 들어 생물 개체수의 변동에 관심을 가진 연구자가 그 변동 추이를 표상하는 수학적 모형을 고안할 수 있다. 그는 다음 세대의 개체수가 전 세대의 개체수와 그 번식률에 비례한다는 간단한 모형을 고안할 수 있다. 이 모형은 부모마다 일정한 수의 자식을 낳는다면, 전체 자식수가 부모당 자식수와 전체 부모의 수의 곱과 같을 것이라는 상식적인 관계를 반영한 모형이다.

$$X_{n+1} = rX_n$$

위의 수학적 방정식에 의해 정의된 모형에서 생물의 개체수는 세대가 거듭될수록 기하급수적으로 증가할 것이다. 그러나 이 모형에 대해 우리는 참이나 거짓을 말할 수 없다. 이 모형은 단지 우리가 만들어낸 상상의 세계이기 때문이다. 그 상상의 세계의 작동방식은 우리가 정의했고, 그 작동방식대로 그 모형은 작동할 뿐인 것이다. 그렇다면 참이나 거짓은 언제 말할 수 있을까?

이론적 모형을 실세계에 적용한 ‘이론적 가설’에 대해서는 참이나 거짓을 얘기할 수 있다. 즉, “위의 방정식에 의해 정의된 모형이 실제 박테리아의 개체수 변동 추이를 묘사한다”고 주장하는 가설을 세웠을 때, 그제서야 우리는 그에 대해 참 거짓을 얘기할 수 있는 것이다. 물론 박테리아 개체수의 변동 추이를 실제 환경 내에서 조사하면, 그 개체수가 초반에는 기하급수적으로 커지는 듯 보이지만, 세대가 거듭될수록 개체수 증가율이 점점 줄어들어 결국 개체수가 일정한 값 이상으로 오르지 않는다는 것을 알 수 있을 것이다. 우리는 다음과 같이 얘기할 수 있다. “위의 방정식에 의해 정의된 모형은 실제 박테리아 개체수가 적을 경우에 대해서만 그 변동 추이를 유사하게 묘사한다”고 평가할 수 있을 것이다.

정리하면, 이론적 모형은 상상의 고안물이고, 이론적 가설은 특정한 모형과 실세계의 일부가 이리저리한 측면에서 닮았다는 주장이다. 우리는 모형 자체에 대해서는 참/거짓을 평가할 수 없지만, 이론적 가설에 대해서는 참/거짓을 평가할 수 있다.

그렇다면 이론이란 무엇인가? 기어리의 정의에 따르면, 이론이란 모형과 이론적 가설들의 느슨한 집합일 뿐이다. 예를 들어, 고전역학 이론이란 고전역학의 여러 방정식과 여러 힘 함수에 의해 정의된 가상의 여러 모형들과 그 각 모형들이 실제 세계의 어떤 부분들과 얼마나 닮았는지를 주장하는 이론적 가설들이 일정한 덩어리를 이룬 것이라고 보면 될 것이다. 즉 이론이란 모형들에 대한 지식과 각 모형의 적용 범위에 대한 지식으로 이루어져 있을 뿐이므로, 우리에게 중요한 것은 모형과 가설이 된다. 다시 정리하면, 과학의 연구자는 실세계를 표상하기 위한 목적으로 모형을 고안한 후, 그 모형이 실세계와 어떠한 점에서 얼마나 닮았다는 가설을 세우고, 그것을 평가하는 일을 하는 사람이다.

2. 모형의 고안

그렇다면 모형은 어떻게 만들 수 있을까? 모형은 상상의 고안물이라고 했듯이, 어떻게 모형을 만들어내느냐는 연구자의 자유에 맡겨진다. 그래서 여기서는 아주 짤막하고 매우 초보적인 팁만 주고자 한다.

첫째, 모형을 고안하기 위해 연구자는 관심 현상과 유사한 다른 현상에 적용되는 모형에 주목할 필요가 있다. 예를 들어 원자의 구조에 대해 관심을 가졌던 19세기 말, 20세기 초의 물리학자들은 원자핵과 전자들이 서로 반대 전하를 띠므로써 그들 사이의 거리에 반비례하는 인력이 작용한다는 점이 태양과 행성들 사이에 거리에 반비례하는 인력이 작용하는 점과 유사하다는 점에 착안하여, 원자에 대한 태양계 유사 모형을 만들어내기도 했다. 그들은 이 모형을 가지고 전자의 궤도라든가 속도 등을 고민하고 연구하며 원자의 구조를 탐색할 수 있었다. 물론 나중에는 그 모형과 실제 원자 사이에 여러 다른 점이 발견됨으로써 그 모형의 적용 범위에 한계가 있다는 것을 깨닫고, 새로운 모형을 고안하게 된다.

한편 19세기 초 빛을 연구하던 일부의 과학자들은 빛이 회절과 간섭의 특징을 보인다는 점에 착안하여, 빛 역시도 파도나 소리처럼 파동의 특성을 가지지 않을까 추측했다. 이러한 추측은 빛이 공간을 가득 채운 에테르란 탄성 매질의 진동에 의해 전달된다는 ‘파동 모형’을 제안하도록 이끌었다.

둘째, 관심 현상의 배경이 되는 이론이 확립되어 있다면, 그 이론을 잘 활용하도록 한다. 예를 들어, 지구의 기온에 대한 문제를 고민할 경우, 이 문제는 기본적으로 물리학과 화학의 문제들과 연관되어 있다. 물리학과 화학, 천문학 등의 확립된 지식 속에서 지구의 기온과 연관될 수 있는 내용을 찾아낼 수 있다면 그것이 가설로 발전할 수 있다. 19세기에서 20세기까지 지구의 기온과 관련한 이론적인 사항은 흑체 복사 문제, 기체의 종류에 따른 태양 복사 흡수율, 흑점 등에 따른 태양의 복사량 변화, 지구의 자전축 변화, 지구와 태양 사이의 거리 변화 등을 들 수 있다. 이러한 배경 지식에 기초하여 연구자는 이러저러한 가설을 세울 수 있다(위어트 2012).

셋째, 배경 이론도 없고 유사한 현상도 찾기 어려운 경우에는, 상식적인 관념을 정교하게 발전시켜서 모형을 만들 수도 있다. 앞서 예를 들었던 생물 개체수 모형은 바로 자식수와 부모수 사이의 상식적인 관계를 수학적으로 정식화하여 만든 모형이다. 우리는 그 모형에 덧붙여서, 정해진 환경 내에서 동물의 개체수가 많아지면 먹이의 부족 등으로 점점 살기 힘들어질 것이라는 또 다른 상식적인 생각을 이용해 환경적인 요소를 모형에 덧붙일 수도 있다. 그래서 환경 내 포화 개체수를 K 로 두어, 개체수가 K 에 근접할수록 개체수 증가가 둔화되도록 다음과 같은 방정식을 만들 수도 있다.

$$x_{n+1} = r \left(1 - \frac{x_n}{K} \right) x_n$$

위의 방정식에 의해 정의된 모형에서 생물의 개체수는 초반에는 기하급수적으로 개체수가 증가하는 듯하다가 점점 증가가 둔화되어 포화되는 S자 형태의 개체수 변화 양상을 보여줄 것이다. 물론 이 모형이 실제 동물의 개체수 변화를 얼마나 정확하게 묘사하는지를 평가하기 위해서는 실세계에서의 실험과 관찰이 필요하다.

이렇게 얘기하면 연구자들이 연구 대상을 살펴보기 전에 모형을 미리 고안하는 것처럼 오해가 생길 수도 있다. 많은 경우 연구 대상을 주의 깊게 살펴보기 전에는 모형을 고안하기가 극히 힘들다. 어떤 연구자가 거대 분자의 구조를 알아내려고 한다고 생각해 보자. 적어도 분자를 구성하는 원자의 개수와 종류는 알아야 무언가를 시작할 수 있지 않을까? 일단 그것까지 알았다고 해보자. 그러나 분

자를 구성하는 원자의 개수가 수천에서 수만 개에 달한다면, 도대체 각각의 원자들이 3차원적으로 어떻게 배치되어 있을지 어떻게 추측할 수 있을까? 그 수많은 원자들을 아무렇게나 이리저리 맞춰봐서는 모형을 완성조차 할 수 없을 것이다.

이러한 상황에서 연구자들은 모형을 미리 수립하지 않은 채 대상에 대한 자료를 수집하고 그것을 표준적인 방식으로 해석함으로써 모형을 나중에 고안해 내기도 한다. 이렇게 고안된 모형은 고안과 동시에 이미 자료에 의해 상당 부분 뒷받침되게 된다. 이를 상향식 접근이라 이름 붙여보겠다. 반면 아직 자료에 의해 뒷받침되지 않은 모형을 미리 가정한 후 출발하여, 모형으로부터 예측을 산출해내고 그것을 자료와 비교함으로써 모형이 실세계에 부합하는지를 확인하는 고전적인 방식을 하향식 접근이라 이름 붙이겠다. 먼저 상향식 접근의 사례를 검토하고, 하향식 접근으로 돌아오도록 하겠다.

3. 상향식 접근

단백질 분자의 구조와 기능을 연구하는 과학자를 생각해보자. 단백질은 그냥 눈으로 관찰한다고 그 분자 구조에 대한 자료를 얻을 수 있는 것이 아니다. 단백질 분자는 눈으로 보기에 너무 작기 때문이다. 그러나 단백질 분자를 결정의 형태로 만들어 X선으로 쏘면 단백질의 구조가 암호화된 일정한 무늬를 만들어낼 수 있다. 그것이 바로 X선 회절 사진이다. 그리고 그 X선 회절 사진 자료로부터 단백질의 구조에 대한 모형을 추론해낼 수 있다. 분자생물학 연구실에서 과학자가 성장하는 과정을 그린 다큐멘터리 영화 『천성적으로 집착적인(Naturally Obsessed)』에는 AMPK(AMP-Activated Protein Kinase)라는 이름을 가진 단백질의 구조를 밝혀내는 연구과정이 잘 묘사되어 있는데, 공식 웹사이트 <http://naturallyobsessed.com>에는 그 과정이 아래와 같이 짧게 요약되어 있다(Rifkind 2009).

연구자는 우선 단백질 결정을 만들어야 한다. 이를 위해 그는 AMPK라는 단백질만을 생산하도록 명령을 내리는 DNA의 특정 부위를 잘라 복제하여 박테리아에 플라스미드로 삽입한다. 그러면 그 박테리아는 그 단백질을 대량으로 생산한다. 이제 단백질을 정제하여 모은 후 결정을 만들기만 하면 되는데, 결정이 만들어지는 조건이 매우 까다롭고 물질마다 다르기 때문에, 연구자는 염의 종류, pH 값, 온도 등 수많은 조건을 미세하게 조절해가며 결정을 만들어내야 한다.

결정을 만들어내는 데 성공하고 나면, 연구자는 결정 시료를 X선 회절 사진 장치에 놓고 여러 방향에서 X선 회절 사진을 찍는다. 때로는 아무런 무늬도 찍히지 않는 경우도 있다. 이때는 처음부터 다시 결정을 만들어야 한다. 만약 사진에 의미 있는 무늬가 찍힐 경우, 그것은 단백질 분자의 구조를 보여주는 중요한 자료로 채택된다(그림 8.1).

이제 연구자는 X선 회절 사진 자료를 컴퓨터 프로그램을 통해 분석한다. 이 컴퓨터 프로그램은 표준적인 X선 회절 이론에 기초하여, 단백질 분자를 구성하는 입자들의 3차원 위치를 알려준다. 알려진 지식에 따르면, 단백질은 20가지 아미노산이 이렇게 또는 저렇게 연결되어 만들어진다. 따라서 연구자는 이제 이러한 생화학적 지식을 이용해 각 위치의 입자들이 어떤 아미노산을 이루고 있는지 결정하는 퍼즐을 풀기만 하면 된다. 그 퍼즐의 해는 거의 유일하기 때문에, 그런 방법으로 퍼즐을 풀고 나

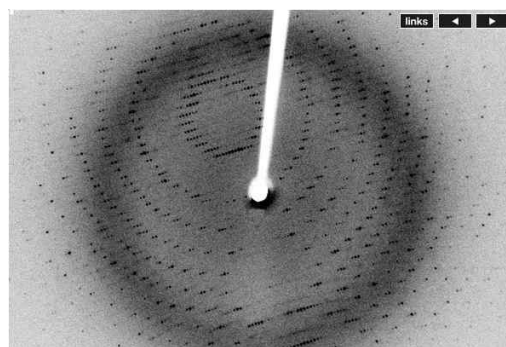


그림 8.1 AMPK 단백질 결정의 X선 회절 사진. 출처 : <http://naturallyobsessed.com>

면 그 단백질 분자 모형은 이미 상당한 자료에 의해 실제 단백질 구조를 반영하는 모형이라 믿을만한 이유가 생긴다(그림 8.2).

우리는 세 가지에 유의해야 한다. 첫째, 대상으로부터 자료를 얻는 과정은 그 자체로 무척 어려운 과정이다. 그것은 실험실의 여러 도구와 절차에 대한 상당한 숙련을 필요로 한다. 그렇기 때문에 대부분의 과학 연구는 실험실에서의 도제와 같은 생활을 필요로 한다. 또한 단백질의 종류에 따라 단백질 결정이 만들어지는 조건이 다르기 때문에, 다른 단백질의 성공 조건이 지침이 되긴 하지만 정답을 알려주진 않는다. 연구자는 수많은 시행착오를 겪을 수밖에 없는데, 그렇다고 연구자는 그 수많은 실패들로부터 단백질 결정을 만들 수 없다고 결론 내리진 않는다.

둘째, 자료를 얻는 과정은 넓은 의미에서 연구자의 추측을 확인하는 과정으로는 볼 수 있지만, 통상 과학의 방법으로 얘기되는 ‘가설 검증’의 과정이라고 말하긴 어렵다. 자료를 얻는 과정에서 겪는 수많은 실패는 어떤 특정한 단백질 구조에 대한 가설의 반증이 될 수 없다. 결정을 만드는 데 실패하거나, 만들어진 결정으로부터 유의미한 X선 회절 사진을 얻지 못했을 때, 그 실험 결과가 반증해줄 어떤 구체적인 가설도 존재하지 않기 때문이다. 다만 연구자는 가설을 확인하거나 반증하는 데 유의미한 자료를 얻지 못했을 뿐이다.

셋째, 자료는 실세계에 대해 간접적으로만 정보를 준다. 자료는 복잡한 실험 과정을 통해서 얻어진 결과물로, 그 자료는 실세계가 어떻게 생겼는지를 곧장 보여주지 않는다. X선 회절에 대한 이론적인 배경 지식이 없는 사람에게 위의 X선 회절 사진은 아무런 의미도 제공하지 않는다. X선 회절 이론을 배경으로 놓을 때에만, 그 사진 자료는 실세계의 단백질 결정 시료에 대해 정보를 제공한다. 컴퓨터 프로그램은 그러한 이론을 이용하여, 사진의 패턴과 크기로부터 결정을 구성하는 입자들의 3차원 배열과 간격을 알려주는 것이다. 그러나 그 정보 역시 완전한 정보는 아니다. 프로그램은 각 위치의 입자들이 어떤 원자이며 어떤 아미노산을 이루고 있는지 완전하게 알려주지는 않는다. 그 문제를 푸는 데에는 생화학적 지식을 이용한 인간의 추측이 필요하다. 따라서 이러한 추측을 통해 얻은 단백질 구조에 대한 결론은 인간이 만든 모형이지 실세계 그 자체가 아니다. 그 모형이 실제 단백질 구조를 잘 나타내는지의 여부는 이러저러한 증거에 의해 뒷받침되고 있을 뿐이다. 그리고 그 증거를 따지는 추론에는 X선 회절 사진뿐 아니라 이전 세대의 과학자들이 이론 성과인 X선 회절 이론과 생화학적 지식도 고려된다.

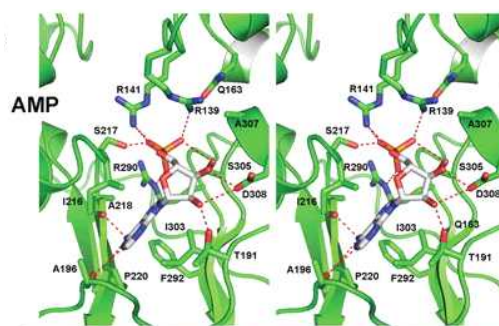


그림 8.2 AMPK에 대해 제안된 단백질 모형의 한 부분. 출처 : Townley and Shapiro (2007).

4. 하향식 접근

일단 어떤 방법으로든 구체적인 모형을 만들었다고 해보자. 상향식 접근에서처럼 모형을 만드는 과정에 이미 그것이 실세계와 들어맞을 만한 이유를 제공하는 자료가 제시되는 경우도 있지만, 그렇지 못한 경우도 많다. 보통 이론적 모형에는 실세계에서 눈으로 볼 수 없거나 접근하기 어려운 부분에 대한 사항이 담겨 있다. 따라서 그 모형이 실세계와 들어맞는지를 확인하기 위해서는, 제안된 모형이 실세계와 들어맞을 경우 실제로 관찰이나 실험을 통해 탐지할 수 있는 사항이 무엇인지를 알아내야 한다. 즉 연구자들은 모형이 실세계와 들어맞을 경우 실세계로부터 얻을 수 있는 자료가 무엇

일지, 모형을 통해 ‘예측’을 해야 한다. 그리고 예측된 대로 자료가 얻어지는지 실험이나 관찰을 통해 확인을 해야 한다.

19세기 초에 이루어진 빛에 대한 연구를 살펴보자(Giere, Bickle, Mauldin 2008, 164-165). 당시에는 빛에 대해 입자 모형과 파동 모형이 경쟁을 하고 있었다. 빛의 입자 모형에 의하면, 빛은 고속으로 움직이는 미립자로 이루어져 있으며 따라서 우리가 광선이라고 부르는 것은 실은 고속으로 움직이는 일종의 입자이다. 한편 빛의 파동 모형에 따르면, 빛은 잔잔한 수면을 건드리거나 팽팽한 줄을 진동시켰을 때 나타나는 파동처럼, 모종의 매질의 운동을 통해 전달되는 파동의 일종이다. 프랑스의 프레넬(Augustin Fresnel)은 빛의 파동 모형을 강하게 주장한 사람 중 하나였다. 프레넬은 프랑스 학술원에서 주는 상을 받기 위해 자신의 모형을 제출했다. 그러나 실제 광선이 그의 모형처럼 이루어져

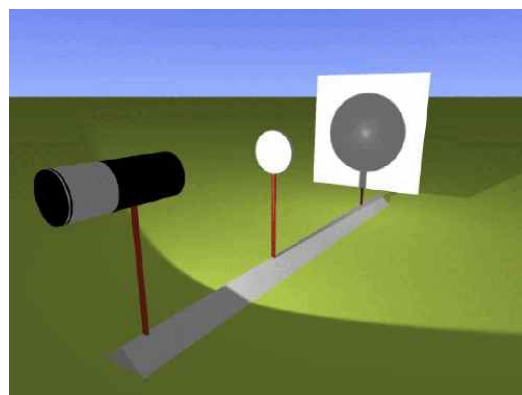


그림 8.3 빛의 파동 모형으로부터 이루어진 한 예측. 작은 원반에 가는 광선을 비추면 생기는 그림자의 한가운데에 밝은 점이 나타나야 한다. 출처 : <http://iopscience.iop.org/1367-2630/13/6/065016/>

있다는 것을 어떻게 믿을 수 있을까? 빛이 파동이라면 응당 확인되어야 할 매질도 인간의 감각으로 확인하기 어렵고, 광선이 물결치는 모습도 눈으로 볼 수 없다. 그럼에도 프레넬의 제안은 얼마 후 프랑스 과학자들 사이에 수용되게 된다. 어떻게 그런 일이 가능했을까?

학술원 심사위원이었던 푸아송(S. D. Poisson)은 프레넬의 모형이 실제 빛의 진행을 묘사하고 있다면 한 줄기의 가는 광선을 작은 원반에 비출 때 생기는 그림자 한가운데에 밝은 점이 나타나야 한다는 점을 수학적으로 추론했다(그림 8.3). 사실 푸아송을 비롯한 심사위원들은 그런 현상이 있다는 말을 들어본 적도 없었다. 또한 그가 생각하기에 앞으로 그런 현상이 확인될 가능성도 아주 희박해 보였다. 알려진 입자 모형 중에도 그림자 한가운데 그런 밝은 점이 보일 거라고 예측한 것은 하나도 없었다. 따라서 프레넬의 가설은 애초에 이미 반박된 것으로 생각됐다. 그러나 아주 면밀하게 제어된 환경에서 실험하자 놀랍게도 바로 프레넬의 모형에서 예측되는 밝은 점이 분명히 나타났다(그림 8.4). 오직 파동 모형에서만 예측되는 현상이 확인된 이러한 자료는 파동 모형이 실제 빛을 정확히 묘사하고 있다는 아주 좋은 증거를 제공하게 된다.¹⁾

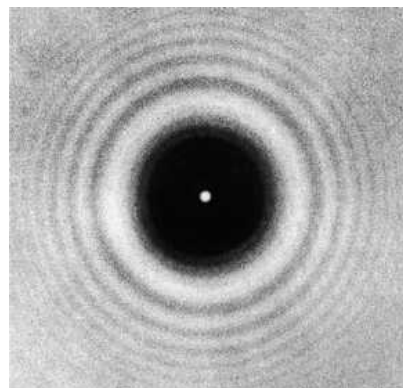


그림 8.4 가는 광선을 작은 원반으로 가렸을 때 나타나는 그림자 무늬. 정교하게 실험을 수행할 경우, 프레넬의 모형에서 예측된 대로 그림자 한가운데 밝은 점이 나타난다. 출처 : <http://www.rakeshkapoor.us/ClassNotes/Diffraction.html>

보다 최근에 이루어진 생물학 연구의 예도 들어보자(Cheng 1992). 알을 낳기 전 비둘기 부부는 서로 부리를 비비며 꾸꾸꾸 우는 모습을 보여준다. 이를 알고 있는 많은 사람들은 수컷의 울음 소리가 암컷의 산란을 유발한다는 낭만적인 생각을 가지고 있었다. 그러나 럿거스대학의 메방 쉹(Mei-Fang Cheng)이란 연구자는 그 생각을 의심했다. 그는 오히려 암컷의 울음 소리가 자신의 산란을 유발한다는 모형을 제안했다. 그런데 암컷이든 수컷이든 그 울음 소리가 산란을 유발한다는 ‘인과 관계’는 눈이나 귀로 직접 확인할 수 없다. 그렇다면 기존 생각이

1) 19세기 빛의 파동 모형은 실세계에 잘 부합하는 것으로 간주되었지만, 20세기 이후 밝혀진 여러 증거들에 의해, 빛은 파동적 성격과 입자적 성격을 모두 가진 존재로 간주되고 있다.

틀렸고 연구자의 새로운 모형이 실제 비둘기 부부의 산란 과정을 제대로 보여준다는 것을 어떻게 확인할 수 있을까? 실세계로부터 어떤 관찰이나 실험적 자료가 나타난다면 그에 대한 긍정적인 증거가 될까? 반대로 어떤 자료가 나타난다면 그에 대한 부정적인 증거가 될까? 연구자는 우선 기존 생각이 실제 비둘기 부부의 산란 과정을 묘사하고 있다면, 암컷이 울지 못하게 되더라도 수컷이 꾸꾸꾸 울어준다면 암컷의 산란에는 영향이 없을 것이라고 ‘예측’했다. 반면 자신의 새로운 모형이 실제 비둘기 부부의 산란 과정을 묘사하고 있다면, 암컷이 울지 못하면 수컷이 울더라도 암컷이 알을 낳지 않을 것이라고 예측했다. 연구자는 이를 실험에 옮겼다. 즉 그는 여러 가지 방식으로 암컷이 울지 못하게 만든 후 비둘기 부부의 행동을 관찰했다. 그 결과, 수컷이 아무리 꾸꾸꾸 울어도 암컷에게는 아무런 일도 일어나지 않았다. 이러한 자료는 기존 견해에 대해서는 부정적인 증거를, 연구자의 새로운 가설에는 긍정적 증거를 제공한다.

메방 청은 위의 증거에 만족하지 않았다. 그는 암컷이 자신의 울음 소리를 ‘듣는’ 것이 산란을 유발한다고 생각했는데, 위의 실험 결과는 그의 가설이 아닌 다른 가설로도 설명될 수 있는 여지가 남아있었기 때문이다. 예를 들어, 우리는 암컷이 울지 못하게 만드는 과정의 어떤 육체적 변화가 암컷의 산란을 방해했을 가능성을 상상할 수 있다. 또한 암컷이 우는 행위를 못함으로써 산란을 못했을 가능성도 있다. 이러한 가능성들에 비추어 볼 때, 위의 실험 결과는 그중 어떤 것이 암컷의 진짜 산란 요인인지를 결정하기에 불충분하다. 이를 결정하기 위해서는 추가적인 실험이 필요하다. 그렇다면 이제는 어떤 실험을 해야 할까?

메방 청은 울지 못하는 암컷에게 녹음된 자신의 울음 소리를 들려주는 실험을 생각했다. 그는 만약 암컷이 자신의 울음 소리를 듣는 것이 산란을 유발한다면, 울지 못하는 암컷 비둘기가 녹음된 자신의 울음 소리를 듣는 것만으로도 알을 낳게 될 것이라고 ‘예측’했다. 실험 결과 알을 낳지 않던 암컷 비둘기는 녹음된 자신의 울음 소리를 들은 후 알을 낳았다. 이러한 결과는 앞서 고려했던 다른 가능성들을 모두 배제해주며, 암컷이 자신의 울음 소리를 듣는 것이 산란을 유발한다는 모형이 아니 고서는 설명되기 어려워 보인다. 따라서 자료는 암컷이 자신의 울음 소리를 듣는 것이 자신의 산란을 유발한다는 가설이 옳다는 매우 좋은 증거를 제공한다.

요컨대, 실세계에 대한 모형을 먼저 구성한 연구자는 그 모형이 실세계와 들어맞을 경우 실세계로부터 얻을 수 있는 자료가 무엇인지 예측한 후, 예측된 대로 자료가 얻어지는지 실험이나 관찰을 통해 확인을 해야 한다. 예측과 자료의 일치 여부는 모형이 실세계와 들어맞는다는 가설의 증거 역할을 하게 된다. 여기서 우리는 네 가지에 유의해야 한다.

첫째, 예측과 자료의 일치는 모형이 실세계를 잘 반영하고 있는지에 대한 간접적인 증거만을 제공한다. 자동차 모형이 실제 자동차와 얼마나 일치하는지 확인하는 일은 간단하다. 자동차 모형과 실제 자동차를 양쪽에 놓고 눈으로 비교해서 다른 부분이 있는지 확인하면 그만이다. 그러나 과학에서 사용되는 모형들은 그런 방식으로 실세계의 대상과 비교될 수가 없다. 왜냐하면 연구자가 만들어낸 모형들은 단백질 분자처럼 매우 작거나, 지구 중심부처럼 직접 접근할 수 없거나, 사람의 마음이나 권력 관계, 계급 관계처럼 눈에는 보이지 않는 것들에 대해 다루고 있기 때문이다. 따라서 우리는 모형과 실세계를 양쪽에 놓고 둘이 일치하는지를 간단하게 확인할 수가 없다. 다만 우리는 관찰과 실험을 통해 실세계의 관련 영역에 대한 부분적인 정보만 얻을 수 있을 뿐이며, 그것과 모형의 예측을 비교할 수 있을 뿐이다. 따라서 우리는 그러한 자료로부터 모형이 실세계와 일치한다거나 불일치한다는 결론을 모 아니면 도 식으로 내리기 어렵다. 일부의 자료를 통해 얻은 연구자의 결론은 일단 “자료가 이러저러한 증거를 제공한다”와 같은 표현으로 시작될 것이다. 증거의 강도는 자료의 질과 양이 결정해줄 것이다. 연구자는 그것을 적절하게 판단해야 한다.

둘째, 대안 모형과 차별화되는 예측이 특별히 중요하다. 예컨대 수컷의 울음 소리가 암컷의 산란

을 유발한다는 모형으로부터 우리는 수컷과 암컷이 모두 꾸꾸꾸 울 때 암컷이 알을 낳을 것이라는 예측을 할 수 있으며 이는 여러 관찰을 통해 이미 확인된 것이다. 그러나 이러한 관찰 자료는 위의 모형이 실제 인과관계를 묘사하고 있다는 가설에 그다지 좋은 증거를 제공하지 않는다. 왜냐하면 그러한 일상적인 관찰은 잠재적인 경쟁 모형인 암컷의 울음 소리가 산란을 유발한다는 모형에서도 쉽게 예측될 수 있는 관찰이기 때문이다. 즉, 모형으로부터 유도된 예측이 실험이나 관찰을 통해 얻은 자료와 일치하더라도 그 자료가 다른 대안적인 모형에 의해서도 예측될 수 있다면, 그 자료는 모형이 실세계와 들어맞는다는 긍정적인 증거를 별로 제공해주지 못한다. 따라서 자신의 모형이 실세계를 잘 반영하고 있다는 증거를 얻기 위해서는 다른 대안적인 모형과 차별화되는 예측을 확인하는 것이 좋다. 그리고 이 문제는 어떤 실험을 할 것인가의 문제와 직결되어 있다. 비둘기 연구자는 왜 하필 암컷의 울음 소리를 제거하는 실험을 수행했는가? 또 왜 하필 녹음된 울음 소리를 들려주는 실험을 추가적으로 수행했는가? 그 이유는 그 실험적 상황에 대해 자신의 모형과 그것의 대안 모형이 서로 다른 실험 결과를 예측했기 때문이다. 이러한 실험만이 일상적인 관찰에 비해 더 엄격한 시험대가 되어 줄 수 있으며, 바로 이러한 실험을 고안해내는 일은 연구자의 중요한 능력이 된다.

셋째, 기존의 모형과 동일한 예측을 해내는 새로운 모형을 개발하는 것도 의미 있는 연구이다. 바로 앞에서 대안적인 모형과 차별화되는 예측을 확인하는 일이 특별히 중요하다고 했지만, 다른 모형과 동일한 예측을 산출해내는 것도 중요한 역할을 한다. 실제로 “당신의 모형뿐 아니라 나의 모형도 현상을 똑같이 예측하고 설명할 수 있다”고 새로운 모형을 제시하는 활동은 오래 전부터 과학의 중요한 역할을 담당했다. 이를 통해 젊은 연구자들은 그전까지 참으로 여겨졌던 이론의 지위를 끌어내리는 동시에 자신의 이론적인 작업이 앞선 이론만큼 우수하다는 것을 알릴 수 있었다. 물론 이것만으로는 자신의 모형이 앞선 모형보다 낫다는 것을 주장할 수 없다. 이를 위해서는 추가적인 작업이 필요하다.

넷째, 예측과 자료의 불일치가 언제나 가설의 거짓을 의미하는 것은 아니다. 예측과 자료가 일치하지 않을 경우, 그 자료는 보통 모형이 실세계와 부합하지 않는다는 증거를 제공하는 것으로 간주된다. 그러나 연구자는 자신의 모형을 폐기하기 전에 두 가지를 고려해 보아야 한다. 우선 자료가 잘못되었을 가능성을 재검토해보아야 한다. 이를 위해 연구자는 실험 과정을 재검토하거나, 실험을 다시 수행해볼 수 있다. 다음으로, 예측이 잘못되었을 가능성도 재검토해보아야 한다. 모형으로부터 하나의 예측을 산출하는 데에는 모형뿐 아니라 수많은 요소가 개입된다. 따라서 자신이 고안해낸 모형의 작동 메커니즘을 잘못 이해했거나 실험 장치나 배경 이론에 대해 잘못된 이해를 하고 있었다면 실세계와 부합하는 모형으로부터도 잘못된 예측이 도출될 수 있다. 때로는 배경 요소에 대해 알려졌던 이해 방식을 수정함으로써 올바른 예측을 만들어낼 수도 있다. 물론 연구자가 모든 지식을 한꺼번에 의심하고 연구할 수는 없기 때문에, 직접적인 연구 대상을 제외한 요소들에 대한 지식들은 일단 참이라고 믿고서 연구를 하는 것이 보통이다. 그러나 자료에 대해서도 의심할 이유가 없고 모형에 대해서도 의심하고 싶지 않다면, 그 때에는 그동안 믿어 왔던 배경지식들을 하나씩 재검토하는 작업이 필요하다. 때로 매우 흥미로운 발견은 그러한 배경 요소에 대한 이해를 교정함으로써 이루어지기도 한다. 물론 이러한 작업을 할 수 있으려면 실험 장치와 실험 절차 및 여러 배경 지식에 대해 충분히 숙지하고 많은 경험을 쌓아야 할 것이다.

5. 상향식 접근과 하향식 접근의 관계

지금까지 상향식 접근과 하향식 접근을 구분하여 설명했지만, 상향식 접근과 하향식 접근은 대립

되는 방법이 아니다. 첫째, 원리적으로 볼 때, 자료로부터 상향식 접근을 통해 얻은 모형은 하향식 접근을 통해 재구성될 수 있다. 예컨대, 특정한 단백질의 분자 구조에 대한 모형을 X선 회절 사진에 대한 분석을 통해 얻어낸 과정을 거꾸로 생각해보자. 모형이 먼저 주어지고, 그 모형과 X선 회절 이론으로부터 X선 회절 사진의 무늬를 ‘예측’한 후, 실제로 장치에서 찍어낸 사진 자료와 그 예측을 비교하여 모형에 대한 긍정적인 증거를 얻는 과정을 우리는 상상할 수 있다. 물론 이는 상상일 뿐이다. 그렇지만 이렇게 상향식 연구 과정을 하향식으로 재구성해보면, 자신의 모형이 실세계와 닮았다는 가설에 대해 자료가 어떻게 증거를 제공하는지 더 명확히 이해할 수 있다.

둘째, 연구자는 상향식 접근을 통해 고안된 모형을 하향식 접근을 통해 추가적인 증거를 확인할 수 있다. 단백질 연구자는 X선 회절 사진을 분석하여 얻어낸 자신의 모형으로부터 단백질의 알려진 ‘기능’을 설명해 내거나 그 기능을 구현하는 ‘메커니즘’을 새로이 예측해낼 수 있다. 실제로 AMPK 단백질을 연구한 연구자는 자신의 모형이 그려낸 단백질 분자의 일부가 마치 팔각 켜졌다 꺼졌다 하는 ‘스위치’처럼 작동할 것으로 예측했고, 그 ‘스위치’가 에너지 대사를 조절할 것으로 기대했다. 원한다면 연구자는 모형이 제안하고 있는 새로운 메커니즘을 확인하는 실험을 고안해볼 수 있을 것이다(Townley and Shapiro 2007, Jin, Townley and Shapiro 2007).

셋째, 하향식 접근처럼 보이는 연구에서도 자료로부터 모형을 이끌어내는 상향 과정이 완전히 배제되는 것은 아니다. 비둘기 산란에 관한 연구에서, 연구자는 어떻게 수컷의 울음 소리나 암컷의 울음 소리가 산란을 유발할 것이라는 모형을 시험하기로 마음을 먹었을까? 이에 여러 이유가 있을 수 있지만, 비둘기의 산란기마다 비둘기 부부가 꾸꾸꾸 울어댄다는 관찰 자료는 연구자가 그러한 모형을 진지하게 고려하는 데 적어도 한 가지 이유를 제공했을 것이다. 즉, 연구자는 비둘기의 울음 소리와 산란 사이의 규칙적인 상관 관계에 대한 관찰 자료로부터 모종의 특별한 인과 관계에 대한 모형을 추측해본 것이다.

요컨대, 상향식 접근과 하향식 접근은 대립되는 연구 방법이 아니며, 실제 연구 과정에서 지속적으로 함께 사용된다. 또한 모형이 실세계와 들어맞는지를 평가하는 대목에서는 상향식 연구도 하향식으로 재구성되어 분석될 수 있다.

6. 과학 논문 작성법

과학의 연구 성과는 보통 전문 학술지에 논문의 형태로 발표된다. 학술지에서는 대개 표준적인 형식을 요구하는데, 과학 논문에서는 IMRAD(Introduction, Materials and methods, Results, And Discussion)이라는 형식이 대표적인 형식으로 자리 잡았다. IMRAD를 구성하고 있는 각 영역인 서론(Introduction), 재료 및 방법(Materials and methods), 결과(Results), 논의(Discussion)에 담아야 하는 내용은 아래와 같이 정리될 수 있다(강호정 2007, 97-134).

- I. 서론** : 연구의 배경, 관련된 기존 연구의 동향, 연구의 목적을 제시하는 부분. 독자가 서론을 읽은 후 연구가 왜 중요하고 필요한지, 관련된 기존 연구에는 어떠한 것이 있으며 그것들의 한계는 무엇인지, 그리고 그 논문이 특히 어떠한 과학적 문제를 해결하고 기여하려고 하는지를 이해할 수 있도록 작성되어야 한다.
- M. 재료 및 방법** : 실험이나 연구를 수행하는 데 필요한 재료와 방법을 제시하는 부분. 실험 재료, 시약, 장비, 연구 장소, 기상 조건, 자료 출처, 자료 수집 방법, 계산 방법, 통계 분석 등 관련된 정보를 구체적으로 제공해야 하며, 전문적인 독자라면 이 부분을 읽어본 후 실험의 수준을 평가할

수 있고, 이 재료 및 방법에 근거해서 누구라도 실험을 재현할 수 있도록 작성되어야 한다.

R. 결과 : 연구를 통해 얻어진 자료를 요약하여 제시하는 부분. ‘재료 및 방법’ 부분에서 제시된 방법론으로 획득된 결과물이 정확히 무엇인지 명확하게 보여줄 수 있어야 한다. 복잡한 정보가 오해 없이 잘 전달될 수 있도록 문장과 표와 그래프를 적절히 활용해야 하며, 자료의 신뢰성을 알 수 있도록 표준적인 통계처리를 해야 한다. 또한 결과에 대한 의미나 해석이 될 수 있는 내용은 이후 ‘논의’에서 다룰 것이므로 포함시키지 않도록 유의해야 한다.

And

D. 논의 : 연구 결과에 근거하여 자신의 과학적 주장을 펼치는 부분. 서론에서 제기한 과학적 문제에 대해 연구자가 어떤 답을 얻었으며, 그 답이 앞서의 결과에 비추어 어떻게 정당화될 수 있으며, 기존 연구들에 비추어 이 연구가 왜 중요한지 등을 이해할 수 있도록 작성되어야 한다. 이를 위해 연구자는 재료 및 방법과 결과로부터 정당화될 수 있는 주장이 어디까지인지 세심하게 검토해야 한다. 단순히 실험 결과를 반복하지 않도록 조심해야 하며, 자신의 답 외에도 실험 결과를 설명할 수 있는 대안적인 가설은 없는지 꼼꼼하게 살펴보아야 한다.

위의 형식은 분명 논문 작성에 도움이 되는 지침이지만, 너무 그것에 얽매일 필요는 없다. 각각의 연구에 따라 논문의 형식은 다양한 방식으로 조금씩 변형될 수 있다. 논문의 가장 중요한 목표는 자신의 과학적 주장을 실세계로부터 얻어낸 자료를 비롯한 여러 근거들을 통해 정당화하는 것이다. 형식은 그것을 위해 필요한 도구이지 목적이 아니란 점을 명심해야 한다.

참고문헌

- 강호정 (2007), 『과학 글쓰기를 잘하려면 기승전결을 버려라: 실험보고서에서 『네이처』 논문까지』, 이음.
- 기어리, 로널드 R., 존 비클, 로버트 F. 몰딘 (2008), 『과학적 추론의 이해』 제5판, 소화. [조인래, 이영의, 남현 옮김]
- 위어트, 스펜서 (2012), 『지구온난화를 둘러싼 대논쟁』, 동녘사이언스. [김준수 옮김]
- Cheng, Mei-Fang (1992), “For whom does the female dove coo? A case for the role of vocal self-stimulation”, *Animal Behavior* 43, 1035-1044.
- Jin, Xiangshu, Robert Townley, and Lawrence Shapiro (2007), “Structural Insight into AMPK Regulation: ADP Comes into Play”, *Structure* 15, 1285-1295.
- Rifkind, Richard, and Carole Rifkind (2009), *Naturally Obsessed: The Making of a Scientist* (영화), PBS. [공식 웹사이트 <http://naturallyobsessed.com/>]
- Townley, Robert, and Lawrence Shapiro (2007), “Crystal Structures of the Adenylate Sensor from Fission Yeast AMP-Activated Protein Kinase”, *Science* 315, 1726-1729.